

高周波プラズマの数値解析

Numerical Study of the Induction-Coupled Plasma Torch

六戸部 豊 信*・明 石 和 夫*

Toyonobu MUTOBE and Kazuo AKASHI

1. 序

1 気圧のオーダーの圧力下での気体の無電極電離現象を最初に研究した人は Babat (1947) である。彼は容器の形状、圧力、周波数等を変化させ、流れのないガス中の電離の状況を研究した。現在のような高周波プラズマトーチへの発展につながる次の段階は Scholz (1959) により展開されたもので、彼はアルゴンガスの流れに、27 MHz の高周波によって磁場を加えることにより、小さなトーチを作動させることに成功した。彼の装置では、プラズマを囲むコイルの中心部にアースされた電極が固定されていたので、半無電極プラズマトーチと呼ぶにふさわしい。その後、Reed (1961)¹⁾ はプラズマが発生した後に電極を取り除く方式を考案し、完全な無電極プラズマトーチの形式が完成した。

最も簡単な高周波プラズマトーチの一般的形式は、下端が開放された石英管の外部に、水冷銅コイルを数回巻いたものである。ガスは電離エネルギーの低いアルゴンが一般的に使われ、プラズマを安定化させるため、上部から石英管の内部に接線方向にガスを流す方式である。プラズマを発生させるには、コイル中に黒鉛棒やタングステンなどの導体を送入して高周波で加熱し、十分な熱電子を供給させる。その結果、電極付近のアルゴンは局所的に電離し、更に入力高めれば、電離した部分が広がり、安定したプラズマが得られる。完全に安定した後で電極をコイル中から引上げる。このようにして得られたプラズマは約 1 万度の高温にも達する。この形式のプラズマは後に述べるように、超高温が得られるという利点以外にも、多くの利点を使いこなすことによって、今後色々な方面への応用が期待されている。

過去 10 年間に、高周波プラズマの改良、その応用、更に理論的解析が、諸外国において精力的におこなわれてきており、特に応用の面では、特殊粉体（球状化粒子や超微粉体）の作成、単結晶の成長、化合物の熱分解、還元、金属酸化物の作成等が報告されている。

高周波プラズマの最大の利点は、高周波コイルによりガスを誘導的に加熱するため、電極を使っていない事、すなわち、電極物質が不純物としてプラズマに混入しないという事であり、この点は電極間のアーク放電を利用するアークプラズマとは根本的に異なっている。次に、

かなり大きな径のプラズマが得られるため、アークプラズマに比べて高温部の領域が大きくなるという事である。その結果、ガスの流速は、高々毎秒数メートルにしかならないので、粉体などの被加熱体あるいは反応物質のプラズマ中での滞留時間が長くなり充分な反応の進行が期待される。更には、アルゴンによってプラズマが一たん発生してしまえば、各種のガスを送入し、置換することによって、各種のガスのプラズマを得ることが可能となる。特に酸化性、窒化性、塩化性雰囲気形成は、アークプラズマのように電極とガスとの反応による浸食を考慮しなければならない装置では不可能な点である。

2. 研究目的

序で述べたような高周波プラズマの特長を利用した応用実験を行うために、また得られた結果を解析し意味ある考察を加えるためには、プラズマ内の温度分布に関する知識がまず第 1 に必要である。

プラズマ温度の測定には、現在のところ光の放射強度による方法が一番適当と考えられ、スペクトル幅吸収法、原子からの線スペクトルによる方法、連続スペクトルによる方法、スペクトル線の拡がりによる方法、分子スペクトルによる方法、レーザー散乱による方法などに分類できる。しかしどの測定法にしても、その依拠する原理に仮定や制約が含まれており、加うるに精密な測定には非常に高い分解能をもつ高価な分光器が必要であり、かつ非常に困難を伴う。

実際に約 1 気圧下でのアルゴンプラズマの温度分布が実測されたのはごく最近であり、その他の実測例も少なく、その中には実測値の信頼性に欠けるものも含まれている。更に、周波数、入力、管径、プラズマの形状や大きさ、ガス流量、ガスの速度分布などの種々のパラメーターがどのように温度分布に影響するかといった基本的かつ系統的研究もほとんどされていない。

よって本研究では、従来発表された高周波プラズマモデルを再検討するとともに、前述のパラメーターを充分に考慮し発展させたモデルを作り、それに基づいて温度分布を計算し、実測例と比較しつつ、その妥当性を論じる事を目的としている。

3. 高周波プラズマのモデル化

実験的には、高周波誘導加熱によって、高出力のプラズマが得られる事が知られているが、誘導電磁場、エネ

* 東京大学生産技術研究所 第 4 部

ルギー収支、そしてプラズマ内の温度分布等を決定するような、一般的な理論的解析は現在の段階ではまだ不十分である。しかし高周波プラズマの設計やそれを使った応用の分野において今後の発展を期するためには、高周波加熱プロセスの抱括的把握がぜひとも必要であるので、過去において、不十分ではあるが幾つかのモデルが提案されてきた。

その第1は、Constant Conductivity Model²⁾ と呼ばれるものである。このモデルは金属の高周波誘導加熱との類推により得られたものであり、後者と異なる点は、

放射、伝導、対流等を考慮している点である。

その第2は、Two-Channel Model³⁾ と呼ばれるもので、アークの範囲を2つの共心的なゾーンに分割し、内部では Constant-Conductivity Model を適用し、外部は電気伝導度がゼロと考え、更にエントロピーの最小原理を導入したものである。

その第3は、一般的なモデルで、Maxwell の場の方程式とエネルギー収支の式を数値計算によって一般的に解いたものと⁴⁾、純解析的に解いたもの⁵⁾がある。

4. Miller の手法による高周波プラズマのモデル化

高周波プラズマ内の温度分布を計算する手法が、過去いくつか報告されているが、現在の段階では、Millerが

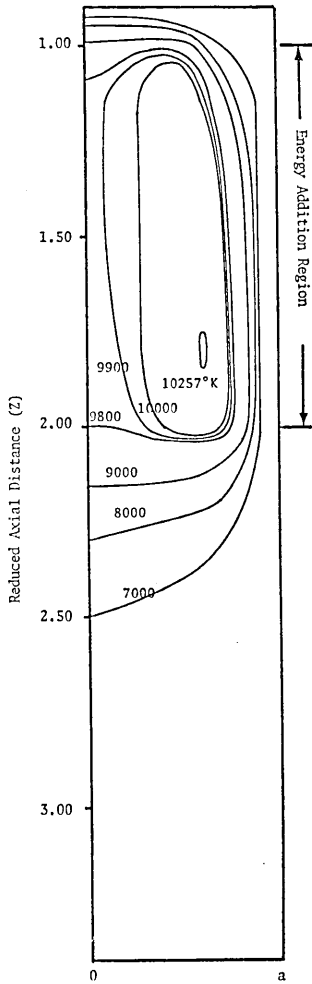


Fig. 1 Computed Temperature Field based on Miller's method
 Tube Diameter: 28 mm
 Frequency: 4 Mc/sec
 B_0 : 55 gauss
 Argon Flow: 22.6 l/min
 Vel. rat.: 10 : 1
 Total power: 4.46 kW
 Radiation: 1.23 kW
 $T(\text{max})$: 10,260°K

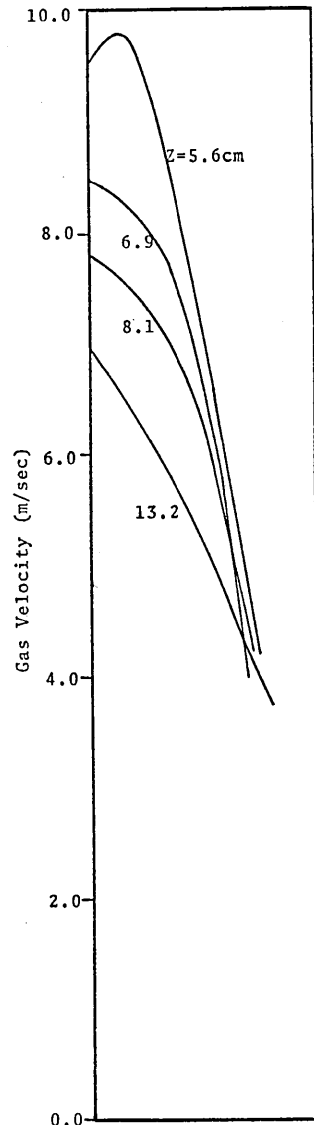


Fig. 2 Velocity Profile Measured by S. V. Desai et al

研究速報

発展させた数値解法⁴⁾は実行計算時間が長くなることを除けば最も優れた手法であると思われる。

彼は以下に示すエネルギー収支の式とマックスウェルの場の方程式を数値解法によって計算した。

$$\rho C_p(DT/Dt) = \nabla \cdot \lambda \nabla T + P - Q_r$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{i} + \partial \mathbf{D} / \partial t$$

ここで、 \mathbf{E} は電場の強さ、 \mathbf{B} は磁束密度、 \mathbf{H} は磁場の強さ、 \mathbf{i} は電流密度、 \mathbf{D} は displacement vector で $\mathbf{D} = c\mathbf{E}$ で示される。また ρ は密度、 C_p は定圧比熱、 λ は熱伝導度、 P は外部入力、 Q_r は放射エネルギーによる熱損失である。

彼の報告によれば、最高温度での温度分布は実験的に求められたそれと 5% 以内の誤差しか含んでないとしており、この程度の誤差は実験誤差に匹敵するものである。

Fig. 1 は Miller の手法により、筆者らが求めた温度分布である。最高温度部が中心軸からずれている事が良くわかる。またコイルの上端 (Energy Addition Region 上端) と管壁近くに急激な温度勾配が見られ (≈ 2 万 °K) プラズマフレームの尾の部分ではなめらかな温度分布 ($\approx 1,200$ °K)。また、コイル部では 1 万 °K 以上のかなり均一な温度分布を示している。

しかし、この計算法ではガスの流速分布を仮定する事が必要となり、それを two-step 関数で表記し、応用している。この点は彼自身も認めているように、Miller の手法における最大の欠点である。

5. 新しいモデル化

高周波プラズマのガス流速分布を実際に測定することは困難であり、その実験的測定例はまだない。しかし、コイル領域よりかなり下部のガス流速を測定した例はある。その唯一の例は S. V. Desai et al.⁶⁾ によるもので、彼らは Boron Nitride を tracer として disk camera に

より流速分布を測定した。その結果を Fig. 2 に示す。ここで、各 Z 値はコイルの下部からの距離を示している。これを見てもわかるように、Miller の仮定した流速分布 (Fig. 3) とは全く異なったパターンを示しており、Miller のモデルを、より実際のプラズマの状況にあわせるためには、流速分布に新しい概念を導入する必要のある事は明らかである。

本研究では、その一つの可能性として、各メッシュにおいて、Mixing of Two Ideal Gas Streams の概念を導入した。

6. 結果

入力パラメーターを変化させる事により、各種のプラズマ状態をシミュレートした。Table 1 は各種プラズマのパラメーターをリストアップしたものである。Fig. 4~Fig. 7 は各ナンバーのプラズマの計算結果を図示し

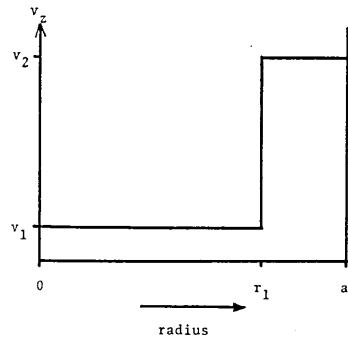


Fig. 3 Assumed velocity field model by Miller

$$* G(\pi a^2) = \rho_1 u_1 (\pi r_1^2) + \rho_2 u_2 (\pi a^2 - \pi r_1^2)$$

where

$$\rho_1 = \frac{2}{r_1^2} \int_0^{r_1} \rho r dr$$

$$\rho_2 = \frac{2}{(a^2 - r_1^2)} \int_{r_1}^a \rho r dr$$

G: total mass flux through the tube

$$* v_2/v_1 = \text{Const. (=VEL. RAT)}$$

Table 1 Parameters for New Model Plasma Conditions. (a=14 mm)

No.	Frequency (Mhz)	B ₀ (Gauss)	Argon Flow (l/min)	Vel. Rat.	P _f (kW)	Q _r (kW)	T _{max} (°K)
1	4	55	22.6	20	3.32	0.82	10,260
2	4	55	22.6	10	3.58	0.90	10,260
3	4	55	22.6	5	3.96	1.03	10,260
4	4	55	11.3	10	4.78	1.30	10,260
5	10	45	30	10	5.74	1.09	10,220
6	10	45	30	5	5.75	1.09	10,220
7	10	55	30	5	9.51	5.83	11,145
8	26	20	22.6	10	1.68	0.00	9,380
9	26	20	22.6	5	1.75	0.00	9,390
10	26	22	22.6	10	2.70	0.01	9,610
11	26	25	22.6	10	3.52	0.07	9,720
12	26	25	11.3	10	3.58	0.07	9,720

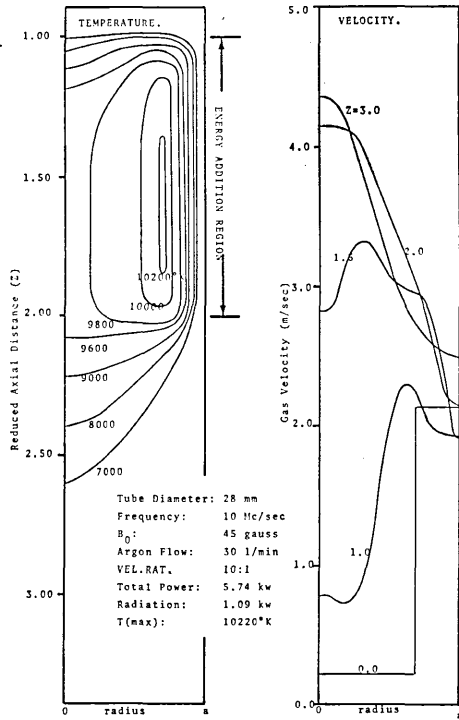


Fig. 4 Computed Temperature and Velocity Field based on New Velocity Model (No. 5-plasma)

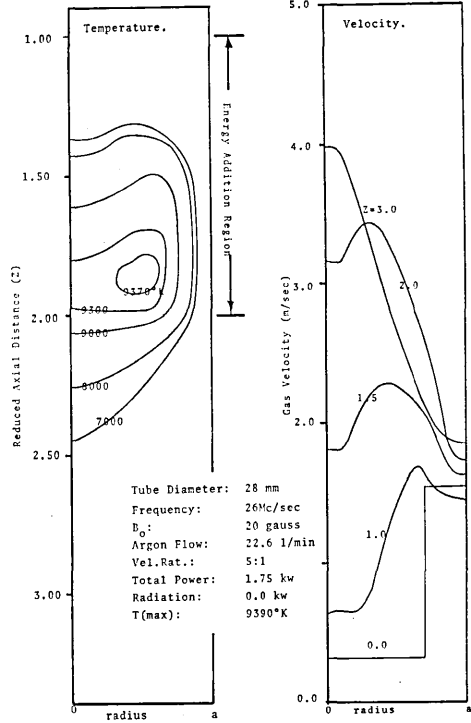


Fig. 5 Computed Temperature and Velocity Field based on New Velocity Model (No. 9-plasma)

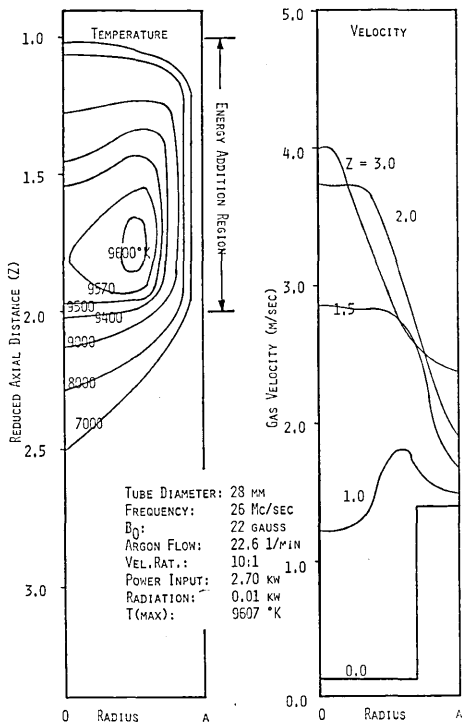


Fig. 6 Computed Temperature and Velocity Field Based on New Model (No. 10-plasma)

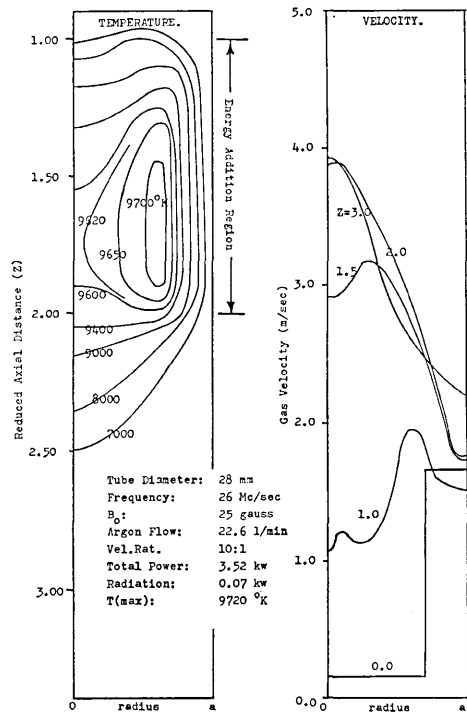


Fig. 7 Computed Temperature and Velocity Field Based on New Model (No. 11-plasma)

研究速報

たものであり、左側は温度分布をまた右側はガス流速分布を示している。特に温度分布の図において Energy Addition Region とあるのはコイル部の長さを示しており、ガス流速分布における各 Z -値は、コイル部の長さで規格化された軸方向の距離を示している。例えば $Z=1.0$ はコイルの上端を、また $Z=2.0$ はコイルの下端を示している。

7. 結 論

1) 当モデルのシミュレーションによる最高温部の温度分布は Gol'dfarb et al.⁷⁾ の実験結果によるものと完全な一致をみており、その差異は 2.5% にすぎず、この程度の誤差は実験誤差に含まれるものである。

2) 速度分布の形状は Desai. et al. の実験結果と一致する。

3) 周波数の高い方がプラズマの安定度は高く、ガス流量にそれ程影響されない。

4) 高周波プラズマを応用した長時間の実験を想定する場合、最高温部をより中心軸に近づけ、壁への熱伝導

を少なくする必要がある。このためには、ガス流量を多くして、入力はずか犠牲にしても放射量と熱伝導量を少なくした方が、プラズマそのものによって何かを加熱する場合には有効である。

5) 周波数、管径、外部入力、ガス流量等の間に存在する複雑な関係を、ある程度明らかにできた。この事は高周波プラズマのスケールアップの重要な鍵になるものである。
(1974年6月19日受理)

参 考 文 献

- 1) T. B. Reed, J. Appl. Phys. **32**, 821 (1961)
- 2) D. R. Armstrong and W. E. Clump, Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop. **7**, 31 (1968)
- 3) M. P. Freeman and J. D. Chase, J. Appl. Phys. **39**, 180 (1968)
- 4) R. C. Miller and R. J. Ayen, J. Appl. Phys. **40**, 5260 (1969)
- 5) H. U. Eckert, J. Appl. Phys. **41**, 3621 (1970)
- 6) S. V. Desai, E. S. Daniel and W. H. Corcoran, Rev. Scient. Instrum., **39**, 612 (1968)
- 7) V. M. Gol'dfarb and S. V. Dresvin, High. Temp. **3**, 303 (1965)

